

共鳴励起型Yb:YAGマイクロチップレーザー

平等拓範* ビル・テュロック** ロバート・エル・バイヤー**

Resonantly Pumped Yb:YAG Microchip Lasers

Takunori TAIRA, Bill Tulloch, and Robert L. Byer

(Received Feb. 28, 1995)

The trivalent ytterbium ion doped YAG is an attractive material for a high power and high stability laser, because it has a smaller quantum defect and a longer upper state life time than Nd:YAG. In the last few years, several reports have been devoted to the study of Yb:YAG lasers. However, a single axial mode Yb:YAG laser has never been reported. In this paper, we have demonstrated a resonantly absorbed Yb:YAG microchip laser to overcome limited pump absorption. Single mode oscillation with output power of 30 mW at 13 mW threshold and 14.8 % slope efficiency was observed in a 10 at. % doped 80 μm thick Yb:YAG microchip laser pumped by a Ti:Al₂O₃ laser. The laser was tuned over 22 GHz without mode hopping by use of an external mirror.

1. はじめに

半導体レーザー (LD) 励起固体レーザーのインパクトは大きく、ランプ励起固体レーザーよりも小型、高効率動作が可能であるだけでなく、光をスペクトルの、空間的に狭い領域に集めた高強度励起が可能となるため準三準位レーザーであるNd³⁺の⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2}遷移 (946 nm) の室温発振を可能にするなど質的な転換をも引き起こした [7]。その後、Ho³⁺の⁵I₇-⁵I₈遷移 (2080 nm) [9]、Tm³⁺の³H₄-³H₆遷移 (2020 nm) [8]、そしてYb³⁺の³F_{5/2}-³F_{7/2}遷移 (1030 nm) [1] 等の準三準位レーザーの室温発振が次々と報告されてきた。

Yb³⁺ (trivalent ytterbium ion) 添加のYAGは励起量子効率が高いため、代表的な固体レーザー

* 福井大学工学部電子工学科 **スタンフォード大学ギンツトン研究所

材料であるNd:YAGに比しても3～4倍の高出力化が期待できる。さらに、レーザー上準位寿命も1msと長く、励起状態吸収(Excited State Absorption)が無いため効率的なQスイッチ動作による高尖頭値出力が望まれる[1-4, 11, 12]。しかしながら、Ybは蛍光幅が非常に広いため単一縦モード発振が困難であり、高コヒーレント化に関する検討は行われていなかった。

本研究では、Yb:YAG結晶の厚みを80μmと極端に薄くし、吸収効率を補うため、エタロンに見られる共鳴効果を利用した励起法を検討し、Ti サファイアレーザーを用いて単一縦モード発振を実現したので報告する。

2. 共鳴励起法の解析

2. 1 Yb:YAG マイクロチップレーザーの検討

一般に、1mm 以下の短い固体レーザー結晶両端面に直接ミラーコーティングを施したマイクロチップレーザーでは、利得(蛍光)幅内に許容される縦モード本数が1ないし2本程度に抑えられるため、容易に単一縦モード発振が実現される[13]。しかし、励起光の吸収効率が低下するため吸収係数が高い材料であることが要求される[14]。レーザー結晶の長さを吸収長に等しくしたときに許容される縦モードの本数を性能指数とするなら

$$m = \frac{\Delta\nu}{(c/2nL)} = \frac{2n\Delta\nu}{\alpha_p c} \quad (1)$$

と定義できる。ここで、 $\Delta\nu$ は蛍光幅、 α_p は吸収係数、 n は屈折率、 c は光速である。表1に代表的なマイクロチップレーザー材料の特性比較を示す。Yb:YAGは蛍光幅が2.66THzと非常に広いため、Nd:YVO₄と比較した場合、マイクロチップレーザーを構成することが約30倍困難になることが分かる。すなわち、単一縦モード発振を得るためには、結晶の長さを100μm以下にしなければならないが、励起光の吸収効率が数%程度に制限され、準三準位レーザーであるYb:YAGが室温発振を実現するために必要な高密度励起が不可能となる。従って、何らかの方法で吸収効率を高めなければならない。

2. 2 共鳴励起法による吸収効率の解析

非線形波長変換効率は基本波の光強度に比例するため、高出力なパルスレーザーを用いなければ十分な変換効率が得られなかった。しかし、近年、エタロン効果を適用した共鳴励起法が提案され、CWの低出力レーザーにおいても90%以上の波長変換が行えるようになった[15-18]。

表1 代表的なマイクロチップレーザー材料の性能指数比較

	Nd:YVO ₄	Nd:YAG	Yb:YAG
$\Delta\nu$ (GHz)	257	177.5	2.66
n	2.165	1.823	1.82
α_p (cm ⁻¹)	31.1 (1.1 at.%)	8.5 (1.1 at.%)	10.5 (10at.%)
λ_p (nm)	808.9	808	939
m	1.19	2.7	30.7

ここでは、共鳴励起法をマイクロチップレーザーに適用することを検討する。図1に共鳴励起型マイクロチップレーザーのモデルを示す。励起側には、共鳴効果を持たせるため部分反射コーティングを施してある。励起側から見た電界に対する実効的な反射率 r_{eff} 、及び透過率 t_{eff} は次式で与えられる。

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 \tilde{g} - r_1}{1 - r_1 r_2 \tilde{g}} \quad (2)$$

$$t_{\text{eff}} = \frac{t_1 t_2 \sqrt{\tilde{g}}}{1 - r_1 r_2 \tilde{g}} \quad (3)$$

また、 $\tilde{g} = e^{\gamma + i\phi}$ である。ここで、 r_1 、 r_2 、 t_1 、 t_2 は各々、入射（励起）面、出射（レーザー出力）面の励起光に対する反射率、及び透過率である。また、 γ は往復吸収損失係数、 ϕ は位相係数である。レーザー媒質の結晶長を L 、波数を k とするなら、 $\gamma = -\alpha_p L$ と $\phi = 2kL$ と表すことができるため、光強度に対する実効反射率は

$$|r_{\text{eff}}|^2 = \frac{(r_1 - r_2 e^{\gamma})^2 + 4r_1 r_2 e^{\gamma} \sin^2(\phi/2)}{(1 - r_1 r_2 e^{\gamma})^2 + 4r_1 r_2 e^{\gamma} \sin^2(\phi/2)} \quad (4)$$

となる。このとき、

$$r_1 = r_2 e^{\gamma} \quad \text{または} \quad R_1 = R_2 e^{-2\alpha_p L} \quad (5)$$

のインピーダンスマッチング条件が満たされた場合、実効的な反射率は零になる。なお、 R は光強度に対する反射率である。同様に、実効的な透過率は、次式で与えられる。

$$|t_{\text{eff}}|^2 = \frac{t_1^2 t_2^2 e^{\gamma}}{(1 - r_1 r_2 e^{\gamma})^2 + 4r_1 r_2 e^{\gamma} \sin^2(\phi/2)} \quad (6)$$

式(4)、(6)を用いて入射した励起光がレーザー媒質に吸収される正味の効率が求まる。励起光とマイクロチップレーザー共振器の周波数が共鳴している場合の実効吸収効率は、次式で与えられる。

$$(\eta_a)_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha_p L}) \frac{1 + (1 - \zeta) e^{-\alpha_p L}}{1 - (1 - \zeta) e^{-2\alpha_p L}} \quad (7)$$

ここで、 ζ は透過や散乱を含んだ往復損失である。式(7)より、損失が無い理想的な状態（ $\zeta = 0$ ）では、共鳴効果により励起光の完全吸収が可能となる。逆に、損失 $\zeta = 1$ の場合、吸収効率は、本来の単行吸収効率である $\eta_a = 1 - e^{-\alpha_p L}$ まで低下する。図2に損失 ζ をパラメータとした実効吸収効率の結晶長依存特性の計算結果を示す。なお、吸収係数には10at.%添加のYb:YAGの値を用いた。計算よりも、結晶長が短くなるほど、損失の影響を大きく受け、効率の低下が著しいが、損失を低く抑えることができれば、Yb:YAGマイクロチップレーザーとして要求される80 μm 程度の結晶長でも数10%以上の励起光吸収が期待できることが分かる。

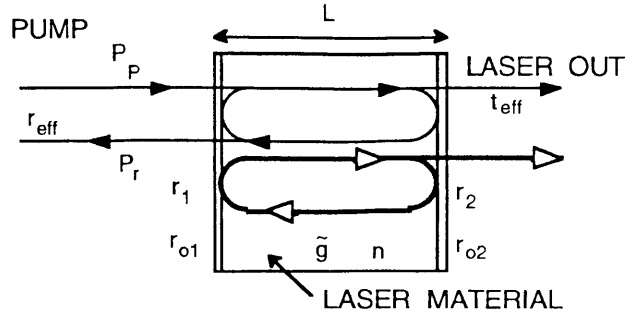


図1 共鳴励起方式のモデル

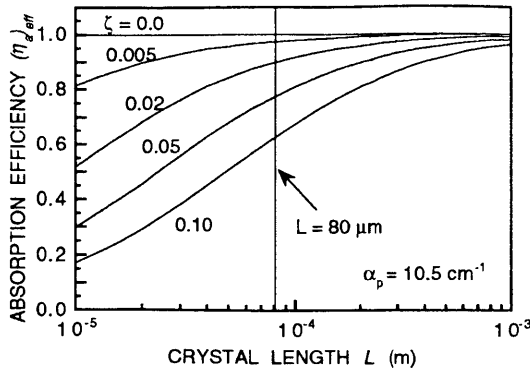


図2 実効吸収効率の結晶長依存特性

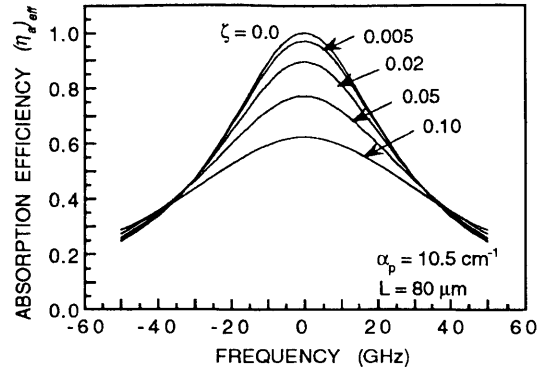


図3 実効吸収効率の共振周波数依存特性

また、共鳴励起法による非線形波長変換では、FM側波帯法を用いて数kHz程度に周波数を安定化させる必要がある。結晶長を80 μm としたときの共鳴励起型マイクロチップレーザの実行吸収効率の周波数依存特性を図3に示す。マイクロチップ共振器と完全に共鳴する励起周波数を零とした。この図より励起周波数の周波数安定度が60GHz程度とかなり制限が緩く、複雑な周波数の制御を行わなくとも、単一縦モードの光源を用意すれば共鳴励起法が実現できることが予測される。

3. 発振特性と検討

図4に、今回試作した共鳴励起型Yb:YAGマイクロチップレーザの実験装置構成を示す。直径4mmでYb濃度10at.%のYAGロッドを厚み80 μm にカットし、両端面にミラーコートを施した。入射側の反射率は、波長1.03 μm に対して99.9%、また910~940nmの範囲で30~90%であり、出射側の反射率は930nm及び1.03 μm に対して各々90%、95%である。さらに、1.03 μm の縦モードを選択するため、曲率50mmの外部鏡を電歪素子(PZT)にマウントし、用いた。励起には920

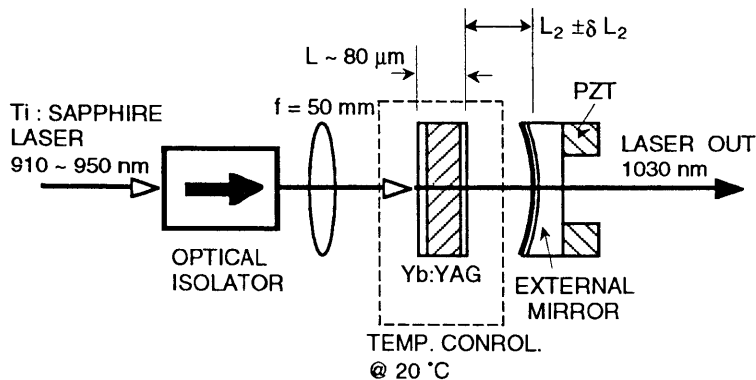


図4 共鳴励起型Yb:YAGマイクロチップレーザの構成

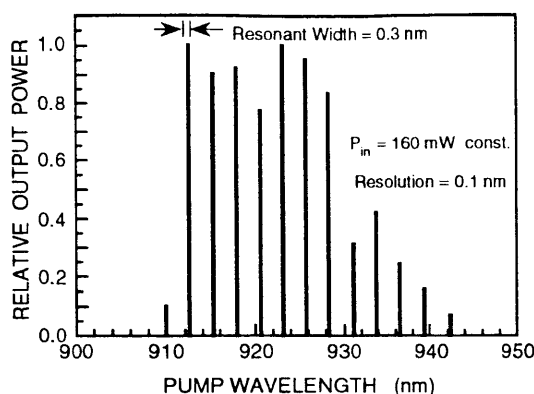


図5 レーザー出力の励起波長依存特性

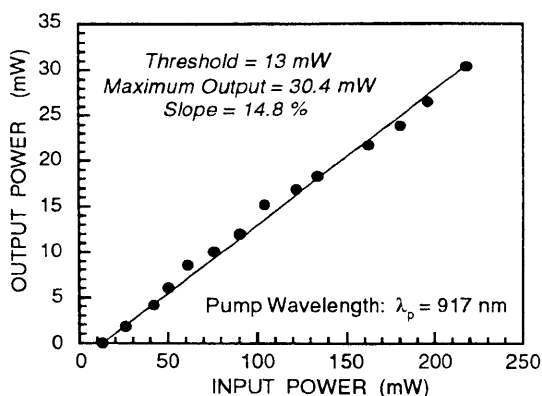


図6 Yb:YAGマイクロチップレーザーの入出力特性

nmで200mW程度のCW出力が得られるTiサファイアレーザーを用いた。励起光は、焦点距離50 mmのレンズによりYb:YAG結晶上でスポット半径29.0 μ m程度に絞られている。なお、Yb:YAG結晶はTEクーラーにより、ホルダー部分で約20℃に温度制御しているが、カバーをしていないため結晶部分では室温程度になっていると思われる。

まず、最適な励起波長を探すため、励起入射光電力を160mWで一定にし、励起波長をスキャンし相対レーザー出力を測定した。図5に結果を示す。Yb:YAGレーザーは、波長910nmから942nmの範囲で、約2.7nm間隔で13箇所発振閾値に達した。これより、Yb:YAG結晶の仕上がり寸法は約87 μ mであったと推定される。励起波長 $\lambda_p = 917$ nmのとき、最大出力が得られた。励起光に対する吸収係数が最大になる波長940nmでインピーダンスマッチングがとれるように反射率設計を行ったが、実際には計算よりも高くなったため短波長側にシフトしたと考えられる。その場合、吸収係数が3.1cm⁻¹まで低下するため、共鳴幅は0.05nm（18GHz）程度まで狭くなるはずである。測定では共鳴幅は約0.3nm、周波数にして107GHzと逆に広がっていた。この理由としては、Tiサファイアレーザーの縦モードがマルチになっており、広いスペクトル幅を有しているためと考えられる。

図6に、Yb:YAGマイクロチップレーザーの出力特性の励起入力光電力依存特性を示す。室温にて発振閾値が13mW、スロープ効率が14.8%、最大出力30.4mWが得られた。この縦モードを、FSRが2GHzのスキャンングファブリーペロー干渉計で観測したところ、全領域にわたり単一縦モード発振であることが確認された。

80 μ m厚のYb:YAG結晶の往復吸収効率は3.7%であり、モードマッチング効率、出力鏡結合効率を考慮するなら、共鳴効果により4倍以上の吸収効率改善が成されたことになる。ファブリーペロー干渉計でTiサファイアレーザーを観測したところ4ないし5本の縦モードが確認された。これより、共鳴状態にあるのは入射光電力の1/4～1/5であり、残りは有効に活用されなかったと考えられる。従って、単一縦モードの光源を励起に用いれば、さらに4～5倍の効率改善が期待できる。

Yb:YAGの蛍光幅は約9.4nm（2.66THz）と広いが100 μ m以下のマイクロチップ共振器を構成

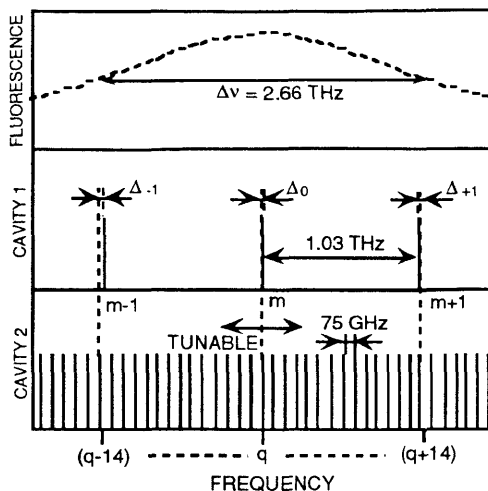


図7 Yb:YAGの蛍光スペクトルと複合共振器縦モードの比較

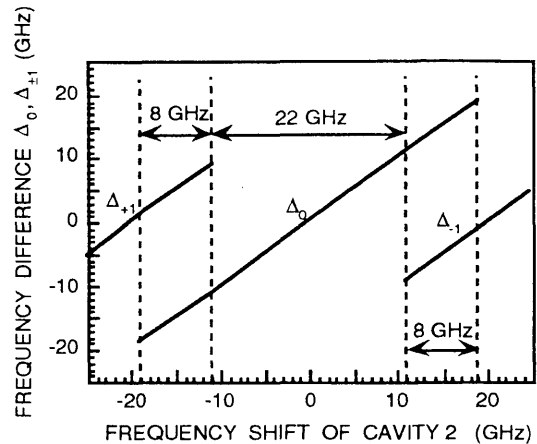


図8 複合共振器効果によるYb:YAGレーザの発振周波数可変特性

することにより単一縦モード発振が実現できる。実用的なレーザとしては、さらに、発振周波数が可同調、可変調であることが求められる。図7に80 μ mの共振器の縦モード及び12mmまで近接した外部鏡による縦モードとYb:YAG蛍光の比較を示す。外部鏡はPZTにマウントされているため、素早く共振器間隔を変化できる。図8に、このレーザの発振周波数可変特性を示す。装置の構成上、外部鏡との間隔を12mm以下にすることができなかつたため、モードホップを起こさずに掃引できる範囲は22GHzに留まったが、本方式の有用性は確認できた。

4. まとめ

以上、現在の代表的な固体レーザであるNd:YAGレーザを超える可能性を持つYb:YAGレーザにおいて、将来、高機能化を図る際に求められる縦単一モード発振をマイクロチップレーザ構成により検討した。このとき、Yb:YAGは蛍光幅が広く、吸収係数も高くない材料であるため、共鳴励起方式を適用し吸収効率を高めた。結果として、厚み80 μ mのマイクロチップレーザを試作し、最初の単一縦モード発振を実現した。特性としては、発振閾値13mW、スロープ効率14.8%、最大出力30.4mWを得た。この種の準三準位レーザとしては、かなりの低閾値特性を実現し、実用的なレベルの出力特性を得ることができたものの、スロープ効率は低い値に留まった。励起に用いたTiサファイアレーザについて調べたところ、縦マルチモード発振でスペクトル幅が広がっており、共鳴励起効果が設計の1/4~1/5まで落ちていたことが原因であったことが分かった。また、発振周波数の同調、変調についても外部鏡を配置し、距離を制御することで可能なことが分かった。今後、周波数同調部の改良及びスペクトル幅の狭いInGaAs系のLDを励起に用いた検討を進めて行く予定である。

マイクロチップレーザは単一縦モード発振を得る簡便で優れた構成であるが、高い吸収係数と狭いスペクトル幅の材料に限られていた。共鳴励起方式は、このような材料による制限を

打破し、マイクロチップ構成を他のEr、Tm、Hoレーザーのように蛍光幅が広く、吸収係数の低い材料にまで拡張することが可能であり、今後の展開が期待できる。

謝辞

本研究を遂行する上で、本学の小林喬郎教授、スタンフォード大学のDr. M. Fejer、ならびにMITリンカーン研究所のDr. T. Y. Fanより有益なる御助言を頂いた。ここに謝意を表す。

<参考文献>

- [1] P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan, Opt. Lett., 16, 1089 (1991).
- [2] T. Y. Fan, IEEE J. Quantum Electron., QE-29, 1457 (1993).
- [3] T. Y. Fan, S. Klunk, and G. Hencin, Opt. Lett., 18, 423 (1993).
- [4] T. Y. Fan, Opt. Lett., 19, 554 (1994).
- [5] R. L. Byer, Science, 239, 742 (1988).
- [6] A. D. Farinas, E. K. Gustafson, and R. L. Byer, Opt. Lett., 19, 114 (1994).
- [7] S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers, and A. K. Cousins, IEEE J. Quantum Electron., QE-28, 997 (1992).
- [8] T. Y. Fan and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electron., QE-23, 605 (1987).
- [9] P. J. M. Suni and S. W. Henderson, Opt. Lett., 16, 817 (1991).
- [10] T. Y. Fan, G. Huber, R. L. Byer, and P. Mitzscherlich, IEEE J. Quantum Electron., QE-24, 924 (1988).
- [11] D. C. Hanna, J. K. Jones, A. C. Large, D. P. Shepherd, A. C. Tropper, P. J. Chandler, M. J. Rodman, P. D. Townsend, and L. Zhang, Optics Communications, 99, 211 (1993).
- [12] A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Witting, U. Brauch and H. Opower, Technical Digest of Advanced Solid-State Lasers Tropical Meeting, Feb. 7-10, 1994, Salt Lake City, UT, paper PD4-1
- [13] J. Zayhowski and A. Mooradian, Opt. Lett. 14, 618 (1989).
- [14] T. Taira, A. Mukai, Y. Nozawa, and T. Kobayashi, Opt. Lett., 16, 1955 (1991).
- [15] W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, and R. L. Byer, Opt. Lett., 12, 1014 (1987).
- [16] C. D. Nabors, R. C. Eckardt, W. J. Kozlovsky, and R. L. Byer, Opt. Lett., 14, 1134 (1989).
- [17] J. P. Cuthbertson and G. J. Dixon, Opt. Lett., 16, 396 (1991).
- [18] W. J. Kozlovsky and W. P. Risk, IEEE J. Quantum Electron., QE-29, 1139 (1993).

